

경상분지 동북부 보경사화산암체의 암석학적 연구

윤성효^{1,*} · 이문원² · 고정선¹ · 김영라¹ · 한미경¹

¹부산대학교 지구과학과, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

²강원대학교 과학교육학부, 200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1번지

Petrology of the Bokyeongsa Volcanics in the northeast Gyeongsang Basin

Sung-Hyo Yun^{1,*} · Moon-Won Lee² · Jeong-Seon Koh¹ · Young-La Kim¹ · Mi-Kyeong Han¹

¹Department of Earth Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

²Department of Science Education, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Abstract: This study has been designed to elucidate the petrography and geochemical characteristics of the volcanic rocks and focused on petrogenesis and tectonic environment of the Bokyeongsa volcanics in the northeast Gyeongsang Basin. The Bokyeongsa volcanics consist of the Naeyeonsan tuff which include rock fragment, plagioclase, quartz and hornblende and pumice showing welded structures, and felsite. According to the petrochemical data, the Naeyeonsan tuff and felsite are in the range of 68~71wt% and 77wt% SiO₂ content, respectively. The Naeyeonsan tuff belongs to dacite/rhyodacite, and felsite to rhyolite. These volcanics rocks belong to the calc-alkaline rock series on the TAS diagram and the AFM diagram. The variations of major elements of the volcanic rocks show that contents of TiO₂, Al₂O₃, FeO^T, MnO, MgO, CaO are inversely proportional to those of SiO₂, but contents of K₂O are positively. They represent differentiation trend of calc-alkaline rocks series. In spider diagram of MORB-normalized trace element patterns, contents of K, Rb, Th and Ta are relatively high, but those of Nb, Zr, Hf, Ti, Y and Yb are nearly similar to MORB. In the chondrite-normalized REE patterns, light REEs are more enriched than heavy REEs. The trace element composition and REE patterns suggest that they are typical island-arc calc-alkaline volcanic rocks formed in the tectonomagmatic environment of subduction zone under continental margin.

Key words: Cretaceous, northeastern Gyeongsang Basin, Bokyeongsa volcanics, dacite ash-flow tuff

요약: 본 연구에서는 경상분지 동북부 보경사화산암체에 대하여 암석성인 및 지구조적 위치에 중점을 두고 화산암류의 암석기재적 및 암석화학적 특성을 연구하였다. 보경사화산암체는 주로 내연산용회암과 규장암으로 구성되고, 유문암질 용회암이 인접하여 분포한다. 내연산용회암은 용결구조를 나타내는 부석편, 사장석, 석영, 각섬석의 반정 그리고 암편으로 구성되는 회류용회암이다. 내연산용회암과 규장암은 각각 SiO₂ 함량이 68~71wt%와 77wt%로서, 내연산용회암은 데사이트/유문데사이트, 규장암은 유문암의 조성을 나타낸다. 이들 화산암들은 TAS 성분도와 AFM도에서 칼크알칼리암 계열의 특성을 보인다. 화산암류의 주성분 변화도에서 TiO₂, Al₂O₃, FeO^T, MnO, MgO, CaO는 SiO₂가 증가함에 따라 감소하는 경향을, K₂O는 증가하는 경향을 보이며, 칼크알칼리암의 분화경향을 나타낸다. MORB값으로 표준화한 미량원소의 거미그림에서 K, Rb, Th와 Ta 함량은 비교적 부화되어 있으나, Nb, Zr, Hf, Ti, Y과 Yb 함량은 MORB와 비슷한 낮은 값을 나타낸다. 운석값으로 표준화한 회토류원소 변화도에서 경회토류원소가 중회토류원소에 비하여 많이 부화되어 있다. 이러한 미량원소 조성 및 회토류원소 변화 경향은 이들 화산암류가 대륙연변부 섭입대의 조구적 환경에서 형성된 전형적인 도호 칼크알칼리화산암임을 지시한다.

주요어: 백악기, 경상분지 동북부, 보경사화산암, 데사이트 회류용회암

서론

아시아 대륙 동북 연변부에 위치한 우리 나라는 백

악기 해양판의 섭입에 관련된 아주 활동적인 화산지역이었으며, 이 화산 활동으로 경상분지 및 옥천대 일원에 유천층군이 형성되었다. 유천층군의 화산암류에 대

* E-mail: yunsh@hyowon.pusan.ac.kr

한 암석학적, 암석화학적 연구 및 화산암복합체의 형성에 관해서는 이미 많은 선행연구가 수행되었다(원종관, 1968; 차문성, 1976, 1979; 김상욱, 1986; 김상욱 등, 1991; 이상만 등, 1987; 윤성효, 1987, 1993; 황상구 · 김상욱, 1994a, 1994b; 황상구, 1996). 이들 연구에 의하면, 유천소분지의 하부 화산암류들은 주사산 중성화산암류로 대표되는 중~고-K 칼크-알칼리 계열의 안산암질암으로 구성되며, 운문사 유문암질암으로 대표되는 상부 화산암류들은 고-K 칼크-알칼리 계열의 데사이트~유문암질암으로 이루어져 있다. 또한, 유천소분지 내의 백악기 화산암류는 칼크-알칼리 계열의 동원 마그마로부터 분화된 것으로 설명되고 있으며, 이 칼크-알칼리 계열의 화성활동과 판구조 운동과의 연관성에 대해 많은 연구가 이루어졌다.

경상분지 동북부에 위치한 본 연구지역인 내연산 보경사 일대는 위도 36°10'N~36°20'N, 경도 129°15'E~129°20'E에 위치하며, 경상분지의 분지발달사적인 측면으로 보면, 의성소분지와 영양소분지 경계의 동남부에 해당하며, 보경사 화산암체(윤성효 등, 1998)로 명명되어 있다.

본 역의 화산암류는 1:50,000 청하도폭(김옥준 등, 1968)에서 보경사 빈암류로 기재된 후, 황상구(1998)에 의해 내연산응회암이라고 명명되었다. 그러나 이 화산암체에 대한 체계적인 화산암석학 및 암석화학적 연구는 현재까지 거의 진행된 바 없다. 보경사화산암체를 구성하는 내연산응회암은 주로 백악기 퇴적암을 피복한 데사이트질 회류응회암으로 하부에서는 다양한 크기의 각력을 포함하고 있으며 상부로 갈수록 각력의 양이 현저히 줄어드는 양상을 보이고 있는 등 화산층서에 대한 보다 구체적인 기재가 필요하다.

본 논문에서는 내연산 응회암에 대한 야외산상, 암석기재를 기초로 화산암류의 주성분원소 및 미량원소, 회토류원소의 분석을 실시하여, 이들 화산암류를 형성한 마그마의 성인 및 조구적 위치를 고찰하였다.

일반 지질

본 연구 지역은 경상북도 포항시 송라면과 죽장면 서부지역에 위치한 내연산과 향로봉 일대이다. 본 역의 지질은 쥬라기 화강암과 백악기 경상누층군에 속하는 퇴적암류를 기반암으로 이들을 분출, 관입한 백악기 화

산암류, 규장암류, 산성 내지 중성 암맥, 그리고 제3기 화산암류와 퇴적암으로 구성된다(Fig. 1).

본 역의 백악기 퇴적암류는 본 지역의 남서부인 영일군 청하면 마북리에서 북북동으로 뻗쳐 영덕군 남정면 선곡동까지 이어진다. 화산암체를 둘러싼 각 퇴적암류의 경사가 대체로 화산암체를 향하여 발달한다. 이 퇴적암류는 주로 담회색 세일, 흑색 세일, 장석질 사암, 응회질 세일과 역암으로 이루어져 있다. 본 역의 남서부 유문암질 응회암 분포지역에서는 퇴적암층이 협재되어 응회암과 호층을 이루며, 상옥리 샘재 일대에서도 이러한 호층이 주로 관찰되며, 퇴적암은 대체로 보경사 화산암체의 화산분출입보다 층서적으로 하부에 놓여있다.

본 연구의 주 대상이 되는 내연산 응회암은 데사이트질에서 유문데사이트질 라필리 응회암이 주 구성암석이며, 하부에서는 장경 20cm에 달하는 크고 작은 다양한 각력이 나타나고, 사장석 반정도 다량 함유하고 있다. 상부로 갈수록 각력과 사장석 반정이 줄어들고, 석영 반정의 양은 다소 증가한다(Fig. 2). 내연산 응회암

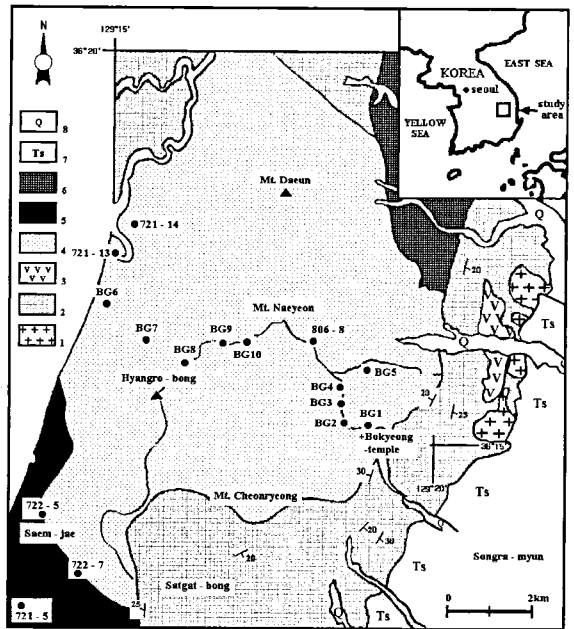


Fig. 1. Simplified geological map of the study area [modified after Kim et al.(1968) and Kwon and Lee.(1973)]. 1, Jurassic granite; 2, Cretaceous sedimentary rocks; 3, andesite; 4, Naeyeonsan tuff; 5, rhyolitic tuff; 6, Jigyungdong volcanics; 7, Tertiary sedimentary rocks; 8, alluvium. Numbers(ex. BG1, 806-8...) in Figure are showing sampling location.

에는 수직, 수평 절리가 잘 발달하여 계곡과 골짜기마다 높은 절벽과 폭포가 발달하였다. 보경사 내 등산로의 고도 150m 지점과 쌍생폭포(고도 200m) 지점에서는 유백색의 규장암이 내연산 응회암을 관입하고 있다.

본 역의 남서부에 위치한 유문암질 응회암은 주로 회백색으로 동질의 암편을 함유하고, 노두에서 피아메(fiamme)와 같은 용결구조를 잘 나타낸다. 산성 내지는 중성 암맥들이 유문암질 응회암 지역을 관입하고 있다.

본 역 동북부에는 제3기 에오세의 화산암류인 지경동화산암이 분포하며, 이는 적색 유리질 용결응회암과 비~약용결 결정 유리질 응회암으로 구성된다(임성아, 1995). 이를 피복하는 제3기 마이오세의 퇴적암층이 본 역 동북부에서 남동부에 걸쳐 넓게 분포한다.

암석 기재

김옥준 등(1968)은 보경사 화산암체를 암녹색을 띠는 보경사 빈암류로 칭하였으나, 본 연구 결과 주로 중~산성 화산활동의 산물인 데사이트질 용결 화성쇄설암(응회암, 라필리 응회암, 응회각력암)으로 밝혀졌다. 본 연구지역의 구성암석을 산출상태와 조성에 따라 1) 내연산 응회암, 2) 규장암, 3) 유문암질 응회암으로 구분되는 데, 이들에 대한 모드 분석치는 Table 1과 같다.

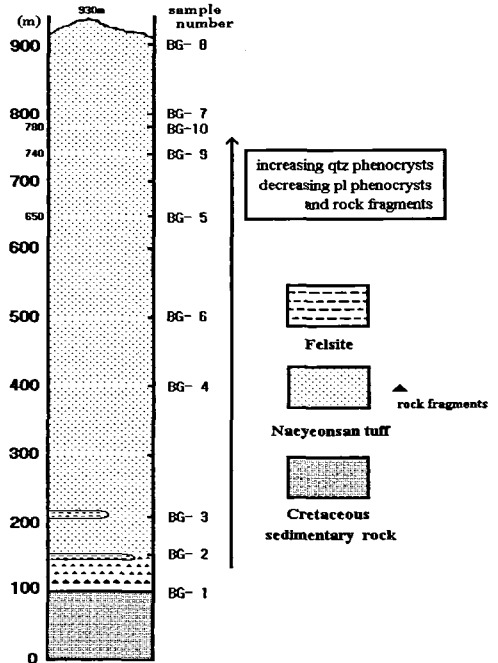


Fig. 2. Stratigraphic sequence of the volcanic rocks in the study area.

내연산 응회암

본 암은 데사이트질 라필리 용결응회암으로서 향료봉, 내연산 및 동대산을 잇는 보경사 화산암체 하부에

Table 1. Modal compositions of the volcanic rocks in the study area.

Rock type	Sample	Ground-mass(%)	Rock fragment(%)	Phenocrysts (%)					
				Pl	Af	Hb	Q	ore	etc.
NT	721-12	47.4	15.9	13.9	14.4	4.4	1.2	2.1	0.7
	806-2	56.9	10.6	8.5	19.2	0.2	3.5	0.3	0.6
	806-3	48.2	10.6	14.4	14.7	5.7	3.7	2.4	0.1
	806-6	51.0	20.7	15.5	7.8	1.8	0.8	0.2	0.6
	806-11	60.7	6.4	9.6	16.5	0.0	5.3	0.9	0.9
	823-5	63.0	11.2	7.5	11.3	3.8	2.2	0.5	0.5
	823-7	66.8	5.1	10.7	15.0	2.6	8.6	0.2	0.3
	823-9	60.6	4.5	7.3	12.8	4.7	7.0	1.6	0.8
RLT	721-5	78.0	5.7	1.2	1.8	0.0	11.5	0.5	1.2
	721-7	84.5	1.5	3.5	6.5	0.0	3.7	0.3	0.0
	722-8	71.6	3.4	4.0	8.5	0.0	11.7	0.6	0.1
	722-10	72.6	1.7	5.0	10.7	0.0	9.0	1.2	0.0

NT, Naeyeosan tuff; RLT, rhyolite lapilli tuff; Pl, plagioclase; Af, alkali feldspar; Hb, hornblende; Q, quartz.

서 산 정상(향로봉 930m)까지 암편과 반정의 분포가 변하면서 분포한다. 고도 약 500m 지점까지의 화산암체 하부는 암청색, 녹흑색의 유리질에 암편과 반정이 다량 들어있다. 노두의 풍화면은 거칠며, 용결 구조와 좁은 간격의 판상 절리가 나타나는 경우가 많다. 암편으로는 최대 20cm 정도가 되는 다양한 크기의 각력이 있고, 흑색 세일, 처어트, 암색의 유리질 암편과 흑색의 유리질에 사장석 반정으로 반상조직을 뚜렷이 나타내는 동질의 암편 등이 있다. 암편은 약 10~20% 정도로 나타난다.

화산암체 하부에서 육안으로 반상조직을 인지할 수 있는 흰색의 반정은 주로 정장석과 사장석으로 된 장석류로서 정장석이 8~19%, 사장석이 9~15%로 구성된다. 석영과 각섬석 반정도 있다. 경하에서 정장석은 파쇄된 것이 많고, 크기는 1~2mm 정도이다. 사장석은 1~4mm의 크기로 칼스바드-알바이트 쌍정이 나타난다. 석영은 1~3% 정도로 소량이며, 주로 용식되거나 파쇄되어 있다. 크기는 1mm 정도로 작은 편이다. 유색광물 반정은 각섬석이 2~5% 정도이고, 침상이 또는 주상으로 쌍정이 잘 관찰되며 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있다. 그 밖에 불투명 광물도 소량 있다. 상부로 가면서 사장석의 함량이 줄어들고 석영 함량이 증가하는 경향이 있다.

기질부는 다양한 정도로 압착된 피아메(fiamme)와 유리 샤아드(shard), 부석편(pumice fragment) 등의 유리질 물질로 구성되어 있으며, 화산암체 하부에서 더 심하게 용결되어 있다. 암편이나 반정광물 주위로 압축 신장된 피아메와 유리 샤아드 등의 유리질 물질이 둘러싸는 형태의 유택시틱(eutaxitic)조직이 관찰되기도 한다.

고도가 높아지면서 암편의 수가 적어지고 반정의 크기가 작아진다. 고도 500m 이상에서는 유리질 기질은 녹회색으로 얼어지고, 암편의 크기는 주로 5mm 이하로 된다. 암편은 사암, 응회암 암편이 주를 이루고, 하부에서 보였던 치밀한 흑색 세일 암편과 흑색의 유리질에 사장석 반정을 가진 데사이트질 암편이 크게 줄어든다. 암편은 5~11% 정도이다. 화산암체 상부에서 육안으로 보이는 반정은 하부보다 적게 나타난다. 경하에서 관찰된 반정은 하부와 마찬가지로 정장석, 사장석, 석영과 유색광물인 각섬석과 불투명광물이다. 사장석은 좀더 파쇄되었으며, 그 양은 사장석이 약 7~10%로 나타난다. 반면 석영 반정은 양이 증가하여 약 9%까지 나타

나고, 크기는 1~3mm로 커지는 경향이 있다. 석영 반정은 하부와 마찬가지로 용식되어 있다. 각섬석 반정은 다소 줄어들고 변질이 심해져 녹니석화된 경우가 더 많다.

유리질은 하부보다 색이 더 얼어 주로 녹회색이며, 부석편이 잘 나타난다. 부석편은 상부로 갈수록 용결정도가 약하며, 유리 샤아드 등이 유리파쇄조직(vitroclastic texture)을 나타낸다. 황상구·조남식(2000)은 내연산응회암에 발달한 용결 염리면의 선구조와 암편들의 최대 평균입도를 이용하여 본 역 남동부 일대가 내연산응회암의 공급지일 것으로 추정하였다.

규장암

보경사 등산로의 고도 150m 지점과 쌍생폭포(고도 200m) 지점에는 내연산 응회암을 규장암이 관입하고 있다. 유백색으로 암편을 포함하고 있지 않으며, 표면은 풍화작용으로 적갈색을 띠고 있다.

경하에서 석영과 장석이 결정질 섬유상의 방사상 배열을 이루는 구과상 구조가 잘 나타난다. 구과는 고온의 탈유리화 작용의 결과로, 크기는 대체로 2mm 내외이다. 구과 사이로 타형의 석영과 장석도 부분적으로 함께 재결정되어 있다.

유문암질 응회암

유문암질 응회암은 회백색의 라필리 응회암으로 보경사 화산암체의 남서부에 분포하며 백악기 퇴적암을 부정합적으로 피복하고 있고, 응회질 퇴적암층이 협재되기도 한다. 이들 퇴적암의 주향은 N20°E이고 경사는 30°NW이다.

육안으로 암편과 반정을 관찰할 수 있고, 용결된 모습이 노두에서 잘 관찰된다. 성법리의 성법령 고개 길가에는 유문암질 라필리 응회암이 하나의 분출단위 내에서 하부에는 용결이 잘 되어 있고, 상부는 용결작용이 뚜렷하지 않으며, 각력을 많이 함유한 것을 관찰할 수 있다.

상육리 샘재 고갯길인 942번 지방 도로가의 노두에서는 용결이 심하게 일어나 기공이 장경 1~4cm로 발생하고 그 자리에 휘발성분에 의해 석영과 녹주석이 침상으로 성장한 리소피세(lithophysae)가 관찰된다(Wright, 1915; Ross and Smith, 1961). 이는 유리(glass)의 탈유리화 결과로서, 냉각 초기 뜨거운 유리가 부분

적으로 변형이 가능할 때 형성된다. 용결 작용이 일어날 때 기포에 휘발성분과 실리카(silica)가 많은 성분이 농집되어 석영과 녹주석이 성장한 것이다. 같은 도로의 100m 정도 떨어진 노두에서는 장경이 1~3cm 정도의 둥근 압편 모양의 누적(accretionary) 라필리를 포함하는 옹회암이 분포한다. 풍화된 곳에서는 기질부가 푸석 푸석하게 뜯어지고, 누적 라필리의 둥근 알갱이가 박혀 있는 모양을 보이며, 경하에서는 각 누적 라필리의 중심은 거칠고 조립질이며, 가장자리로 갈수록 세립으로 변하는 림(rim)형태이다(Moore and Peck, 1962). 이 누적라필리의 성인에 대하여 Reimer(1983)와 Schumacher and Schmincke(1991)는 화산 분출시 공중에 뜬 화산재와 응결된 수분의 작용으로 화산재가 정전기력과 입자간 응집력으로 모일 때 응결된 수분의 표면장력에 의해 계속 붙잡혀 있고 바깥쪽으로 다시 화산재가 붙게 된 결과라고 보고한 바 있다.

현미경 하에서 유문암질 옹회암은 동질의 압편이나 사암, 처어트 등의 압편이 있고, 반정으로는 석영과 사장석, 정장석이 주를 이룬다. 석영은 자형이 드물며 대부분 용식되어 있다. 장석 반정은 대부분 파쇄되어 있고, 사장석 반정보다 정장석 반정이 더 많다. 유리질은 노두에서 부석편이 압축 신장된 것이 나타나고, 경하에서 탈유리화 작용으로 재결정된 장석과 석영의 모자이크 구조를 보인다.

광물 화학

내연산옹회암 중 대표적인 데사이트질 라필리 옹회암을 택하여서, 이 암석의 주요 조암광물들을 대상으로 EPMA분석을 하였다. 광물들의 화학성분 분석은 기초과학지원연구소 대전본소의 CAMECA SX-51 전자현미분석기를 이용하였다. 분석조건은 조사전류 20mA, 가속전압 15kV, 빔직경 1 μ m이고, 측정시간은 피크인 경우 10초, 배경치인 경우 5초간이다. 분석된 주요 조암광물은 각섬석, 사장석이다. 전자현미분석에서 FeO와 Fe₂O₃의 함량을 따로 구할 수 없으므로, 철의 총량을 FeO⁺로 가정하였다.

각섬석

내연산옹회암 내의 각섬석은 하부에서는 주로 녹색의 장주상의 자형 결정으로, 상부에서는 부분적으로 파

쇄되거나, 변질되어 나타난다. 각섬석 내에 인회석이 포획되어 있는 것도 있다. 각섬석의 분석치는 Table 2와 같다. 이를 B_{Na+Ca}에 대한 B_{Na}비의 분류표(Fig. 3)에 도시해 보면, 모두 B_{Na+Ca} \geq 1.34, B_{Na} \leq 0.67인 calcic amphibole group에 속한다.

사장석

내연산옹회암에 함유된 사장석 반정은 쌍정이 잘 관찰되며 누대 구조는 보이지 않는다. 분석된 사장석 반정은 An₀₅₋₃₅으로, An의 함량이 낮다(Table 3). Or-Ab-An 단성분 분류도에 도시한 결과, 대부분은 올리고클레이스(oligoclase; An₁₁₋₃₀)에 도시되나, 일부 사장석은 알바이트(albite; An₀₅)와 안데신(andesine; An₃₅)에 해당한다(Fig. 4).

암석 화학

내연산옹회암의 특성과 조구적 위치, 성인을 밝히기 위해 채취한 시료 중 대표적으로 신선한 15개의 시료(Fig. 1에 표시된 내연산 옹회암 시료 8개, 유문암질 옹회암 시료 3개, 규장암 시료 2개)를 선택하여 화학분석을 하였다. 주성분원소 분석은 기초과학지원연구소 서울분소에서 Philips의 PW1480 X-선형광분석기(XRF)를 이용하여 분석하였다. 미량원소와 희토류 원소의 분석을 위해 9개의 시료(BG1~BG9)는 기초과학지원연구소 대전본소의 PQ3(VG Elemental, U.K) 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였다. 미량원소 중 Sr, Ba, Li, P, Sc, V, Cr, Zn, Zr은 ICPS-1000III(Shimadzu, Japan) 유도결합플라즈마 방출분광기(ICP-AES)로 분석하였다. 그리고 6개의 시료(721-13, 14, 5, 722-5, 7, 806-8)는 기초과학지원연구소 서울분소에서 VG Elemental의 PQ II plus 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였고, Zn, Ni, Sr, Ba, V는 Jobon Yvon 138 Ultrace 유도결합 플라즈마 방출기(ICP-AES)로 분석하였다. Zr은 서울분소에서 Philips의 PW1480 X-선형광분석기로 분석하였다. 화학분석을 실시한 시료의 위치는 Fig. 1에 도시하였다.

주성분 원소

각 화산암류의 주성분원소 함량과 계산한 CIPW 노름(norm)광물 값의 결과는 Table 4와 같다.

Table 2. Chemical compositions of representative hornblende from the Naeyeonsan tuff in study area.

Sample	806-2	806-4	806-5	806-7	806-8	806-1a	806-1b	806-1c	806-1d	721-14
SiO ₂	45.94	45.43	47.68	45.50	45.39	47.64	46.31	45.33	45.21	45.74
TiO ₂	2.05	2.18	1.65	2.33	2.09	1.66	1.82	2.30	2.30	1.92
Al ₂ O ₃	8.00	7.93	6.80	8.57	8.24	6.52	7.85	8.47	8.56	7.95
FeO ^T	13.68	13.29	13.31	12.88	13.64	14.04	12.81	11.99	12.16	12.97
MnO	0.38	0.50	0.63	0.41	0.56	0.37	0.58	0.47	0.52	0.40
MgO	13.75	13.93	14.66	13.89	13.85	14.22	14.63	14.62	14.48	14.39
CaO	11.25	11.17	11.02	11.15	10.98	10.98	10.77	11.19	11.16	11.12
Na ₂ O	1.77	1.83	1.63	1.92	1.83	1.47	1.91	1.97	2.00	1.83
K ₂ O	0.54	0.55	0.49	0.51	0.68	0.54	0.51	0.51	0.47	0.44
P ₂ O ₅	0.06	0.01	0.04	0.05	0.08	0.05	0.02	0.04	0.04	0.15
Total	97.42	96.82	97.91	97.21	97.34	97.49	97.21	96.90	96.91	96.91

Cations based on 23 oxygens										
TSi	6.80	6.76	6.98	6.73	6.74	7.02	6.83	6.70	6.69	6.79
TAI	1.20	1.24	1.02	1.28	1.27	0.98	1.17	1.30	1.31	1.21
CAI	0.19	0.15	0.15	0.22	0.18	0.15	0.19	0.18	0.18	0.18
CTi	0.23	0.24	0.18	0.26	0.23	0.18	0.20	0.26	0.26	0.21
CMg	3.03	3.09	3.20	3.06	3.06	3.12	3.22	3.22	3.20	3.18
CFe ²⁺	1.55	1.52	1.47	1.46	1.53	1.54	1.39	1.34	1.37	1.43
BFe ²⁺	0.14	0.14	0.17	0.13	0.17	0.19	0.19	0.14	0.14	0.18
BMn	0.05	0.06	0.08	0.05	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.05
BCa	1.78	1.78	1.73	1.77	1.75	1.73	1.70	1.77	1.77	1.77
BNa	0.03	0.02	0.03	0.06	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.00
ANa	0.48	0.51	0.44	0.50	0.51	0.39	0.51	0.54	0.55	0.53
AK	0.10	0.10	0.09	0.10	0.13	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08

본 역의 화산암류는 SiO₂가 68~82wt% 범위를 보인다. 내연산용회암의 SiO₂함량은 68~71wt%로서 데사이트~유문데사이트질암이고, 유문암질 용회암은 SiO₂의 함량이 75~82wt%, 규장암은 77wt%이다.

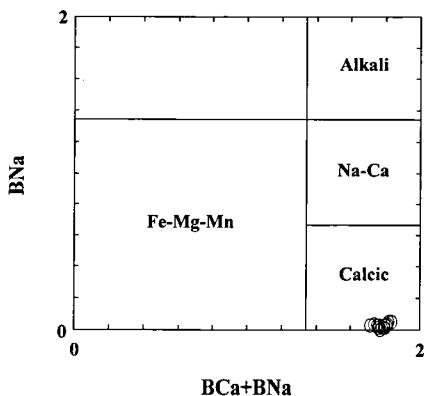


Fig. 3. Classification of amphibole from the Naeyeonsan tuff according to BNa vs. BNa+Ca (Leake, 1978).

본 역 화산암류들 Zr/TiO₂-SiO₂ 화산암 분류도 (Winchester and Floyd, 1977)에 도시해 본 결과, 내연산용회암은 데사이트-유문데사이트 영역에, 유문암질 용회암과 규장암은 유문암 영역에 도시되었다(Fig. 5).

각 산화물은 SiO₂가 증가함에 따라 TiO₂의 함량은 0.55에서 0.11wt%로, Al₂O₃의 함량은 14.62에서 10.23wt%, FeO^T은 3.68에서 0.75wt%, MgO는 1.24에서 0.08wt%, CaO은 3.04에서 0.10wt%, P₂O₅은 0.16에서 0.00wt%, Na₂O는 4.75에서 1.68wt%로 감소하고, K₂O는 2.60에서 4.74wt%로 증가하는 경향이 있다(Fig. 6). MgO의 감소는 마그마 내에서 철마그네슘 광물의 분별 정출을 의미하고, CaO와 Al₂O₃의 감소 경향은 사장석의 분별 정출에 의한 것이다. 그러나 Na₂O가 감소하는 경향은 변질에 의한 것으로 사료된다. 이들은 경상분지 내 백악기 화산암류의 일반적인 변화 경향과 유사하다. 내연산용회암과 유문암질 용회암 사이에는 SiO₂ 함량이 71wt%에서 75wt%의 갭(gap)이 존재하고, 내연산용회

Table 3. Chemical compositions of representative plagioclase from the Naeyeonsan tuff in the study area.

Sample	806-1a	806-1b	806-2a	806-2b	806-2c	806-2d	806-2e	806-5a	806-5b
SiO ₂	59.79	61.68	64.86	65.30	62.11	61.00	62.82	67.42	65.89
TiO ₂	0.01	0.00	0.04	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	25.02	23.65	21.50	21.41	23.16	24.19	22.88	19.83	21.21
FeO ^T	0.23	0.18	0.12	0.28	0.24	0.16	0.21	0.00	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.05	0.00	0.00	0.08
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	7.21	5.78	3.08	3.04	5.09	6.35	4.80	1.02	2.25
Na ₂ O	7.06	7.77	8.72	8.91	8.42	7.44	8.16	11.02	10.21
K ₂ O	0.46	0.70	1.35	1.23	0.15	0.65	0.83	0.15	0.15
P ₂ O ₅	0.02	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02
Total	99.79	99.80	99.69	100.25	99.22	99.85	99.77	99.49	99.81
Cations based on 8 oxygens									
Si	10.69	10.99	11.50	11.51	11.10	10.88	11.17	11.87	11.60
Al	5.27	4.96	4.49	4.45	4.87	5.08	4.79	4.11	4.40
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ²⁺	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Ca	1.38	0.10	0.59	0.57	0.97	1.21	0.91	0.19	0.42
Na	2.45	2.69	3.00	3.05	2.92	2.57	2.81	3.76	3.49
K	0.11	0.16	0.31	0.28	0.03	0.15	0.19	0.03	0.03
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mole percent (%)									
Ab	62.20	68.00	77.10	78.20	74.30	65.40	71.90	94.30	88.40
An	35.10	27.90	15.10	14.70	24.80	30.90	23.30	4.80	10.80
Or	2.70	4.00	7.80	7.10	0.90	3.80	4.80	0.90	0.90

암을 형성한 화산중심과 유문암질 응회암을 형성한 화산중심이 다르다고 볼 때, 두 화산암류 사이에는 불연속적인 변화를 보이며, 성인을 달리 하는 것으로 해석될 수 있으나, 광역적인 관점에서는 인접한 지역의 화산암류가 일정한 변화경향을 보이는 것으로 해석된다.

화산암류의 암석계열을 알아보기 위해 Irvine and Baragar(1971)의 분류도인 TAS(total alkali-silica) 성분도에 적용해보면, 이 지역 화산암류는 비알칼리암 계열(subalkaline rock series)에 점사된다(Fig. 7).

전암 화학 성분을 AFM도에 도시한 결과(Fig. 8), 본역의 화산암류는 전형적인 칼크-알칼리 계열의 평균치에 유사한 경향을 보인다. 즉, 이 암석들은 철이 농집되는 현상이 분화의 초기 단계에 보이지 않고, 분화 후기 단계에 알칼리가 부화되어 나타난다. SiO₂에 대한 K₂O의 성분도(Gill, 1981)에서 내연산응회암은 대부분 중~

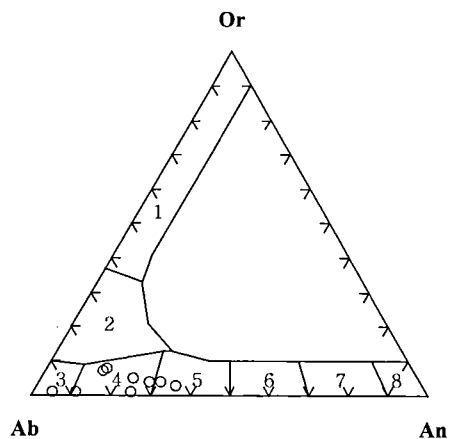


Fig. 4. Plagioclase compositions of the Naeyeonsan tuff rocks in the study area (Deer et al., 1972). [1, sanidine; 2, anorthoclase; 3, albite; 4, oligoclase; 5, andesine; 6, labradorite; 7, bytownite; 8, anorthite].

Table 4. Major element compositions and CIPW norm of the volcanic rocks in the study area.

Sample	721-13	721-14	806-8	BG-1	BG-5	BG-6	BG-8	BG-9	721-5	722-5	722-7	BG-2	BG-3
	Naeyeosan tuff						Rhyolitic tuff			Felsite			
SiO ₂	68.07	69.02	67.68	68.20	67.91	70.40	70.70	68.53	75.20	76.82	82.32	77.06	76.97
TiO ₂	0.50	0.49	0.51	0.54	0.55	0.46	0.46	0.51	0.24	0.18	0.13	0.11	0.12
Al ₂ O ₃	14.37	14.30	14.52	14.62	14.62	14.03	13.84	14.51	13.22	13.00	10.23	12.06	12.32
Fe ₂ O ₃	1.51	1.25	1.64	1.53	1.55	1.84	1.74	1.54	0.64	0.47	0.742	0.59	0.56
FeO*	2.04	1.67	2.21	2.07	2.10	1.65	1.57	2.07	0.58	0.42	0.37	0.53	0.50
MnO	0.07	0.04	0.09	0.11	0.11	0.09	0.08	0.11	0.07	0.10	0.06	0.02	0.00
MgO	1.08	0.76	1.19	1.16	1.24	0.98	0.96	1.11	0.27	0.16	0.08	0.11	0.08
CaO	2.05	2.45	2.56	2.89	3.04	2.01	1.79	2.53	0.89	0.25	0.39	0.10	0.27
Na ₂ O	4.75	3.92	3.54	3.98	3.95	3.75	3.52	3.88	4.33	2.80	1.68	3.97	3.36
K ₂ O	2.60	2.96	3.14	3.08	2.89	3.23	3.22	3.03	3.29	4.57	3.18	4.31	4.74
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.13	0.16	0.16	0.14	0.14	0.15	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01
LOI	1.27	1.80	0.81	0.97	1.21	1.14	1.33	1.31	0.41	0.89	1.15	0.67	0.59
Total	98.43	97.78	98.01	99.54	99.56	99.90	99.52	99.51	99.17	99.67	100.01	99.60	99.39
CIPW Norm													
Q	24.71	29.13	28.02	25.46	25.70	30.85	33.30	27.38	35.55	42.70	60.01	37.41	38.93
or	15.83	18.05	19.11	18.50	17.40	19.40	19.40	18.30	19.71	27.36	19.03	25.80	28.30
ab	41.32	34.16	30.78	34.20	34.00	32.20	30.40	33.50	37.06	23.96	14.36	33.90	28.70
an	9.75	11.81	12.29	13.10	13.90	9.30	8.20	11.90	4.30	1.20	1.96	0.40	1.30
C	0.27	0.45	0.93	0.00	0.00	1.00	1.60	0.60	0.98	3.04	3.34	0.70	1.20
Di(wo)	—	—	—	0.20	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—
Di(en)	—	—	—	0.10	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—
Di(fs)	—	—	—	0.10	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—
Hy(en)	2.78	1.96	3.06	2.80	3.00	2.50	2.50	2.80	0.68	0.40	0.20	0.30	0.20
Hy(fs)	1.85	1.34	2.08	1.80	1.80	0.90	0.80	1.90	0.26	0.28	0.24	0.40	0.30
mt	2.26	1.87	2.44	2.30	2.30	2.70	2.60	2.30	0.94	0.69	0.61	0.90	0.80
il	0.98	0.96	1.00	1.00	1.10	0.90	0.90	1.00	0.46	0.35	0.25	0.20	0.20
ap	0.27	0.27	0.29	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30	0.07	0.02	—	—	—

* FeO, determined wet chemical analysis.

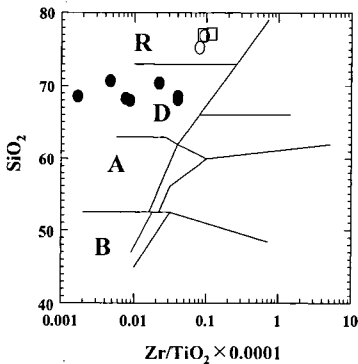


Fig. 5. Zr/TiO₂-SiO₂ diagram for the volcanic rocks in the study area (from Winchester and Floyd, 1977). (R, rhyolite; D, rhyodacite-dacite; A, andesite; B, basalt). Filled circle, Naeyeosan tuff; open circle, rhyolitic tuff; rectangle, felsite.

고-K 경계에 속하며, 칼크-알칼리암의 특징을 보인다. 유문암질 응회암은 중~고-K 영역에, 규장암은 고-K 영역에 해당한다(Fig. 9).

미량원소 및 희토류원소

본 역의 화산암류의 미량원소 함량과 희토류원소 함량을 Table 5와 6에 나타냈다. 전체 희토류원소 함량은 내연산응회암이 111~148ppm, 규장암이 150~161ppm, 유문암질 응회암은 143~232ppm으로 유문암질 응회암이 더 높게 나타난다. 미량원소 중에서 맨틀 광물에 대해 불호정성인 성분을 평균 MORB값(Pearce et al., 1981)으로 표준화하여 거미그림으로 나타냈다

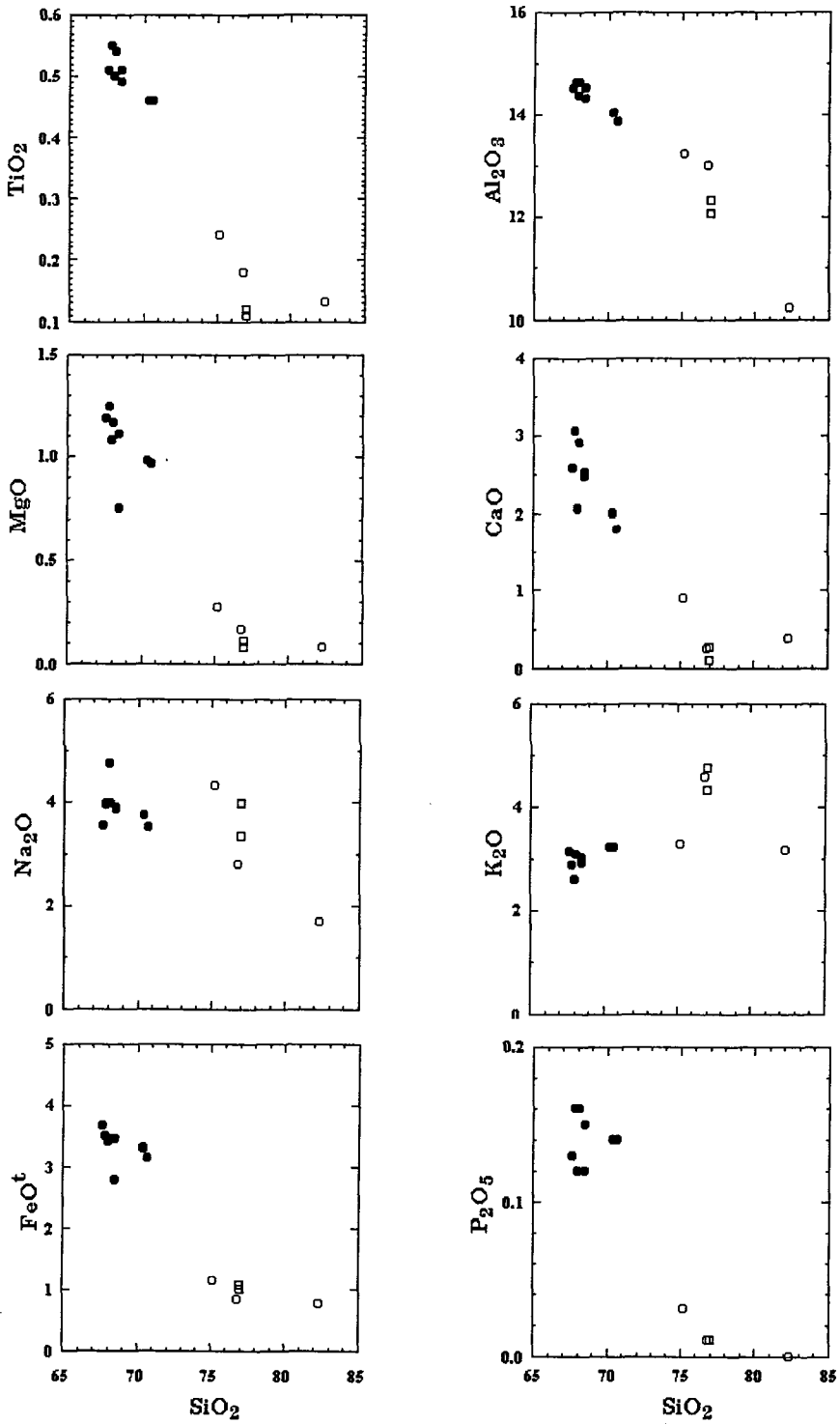


Fig. 6. Harker diagrams for major elements of the volcanic rocks in the study area. Symbols are the same as those in Fig. 5.

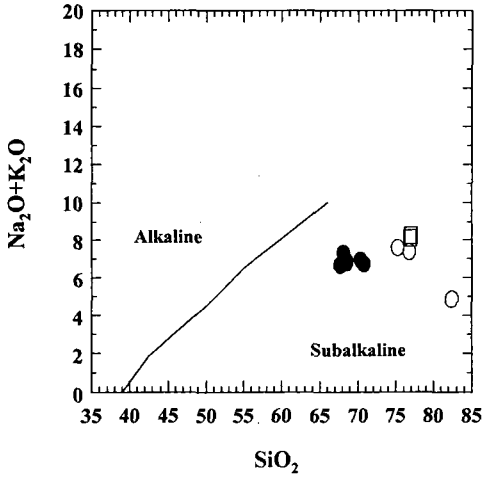


Fig. 7. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 diagram of the volcanic rocks (from Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as those in Fig. 5.

(Fig. 10). 그림에서 원소의 배열은 Pearce *et al.* (1981)의 배열 방법을 따랐다. Sr을 제외한 K, Rb, Ba, Th, Ta와 같이 함수유체에서 유동성이 높은 원소들은 MORB에 비하여 상당히 부화되어 있는 반면에 Nb, Zr, Hf, Ti, Y, Yb 같이 유동성이 낮은 원소들은 MORB와 비슷하거나 결핍된 양상을 보인다. Sr이 결핍되어 나타나는 것은 사장석의 분별 정출에 의한 것으로 생각된다.

Ce, Sm가 약간 부화되는 것은 이들 원소가 함수유체에 의해 생긴 규산염 용액에 의해서 운반된 것으로 생

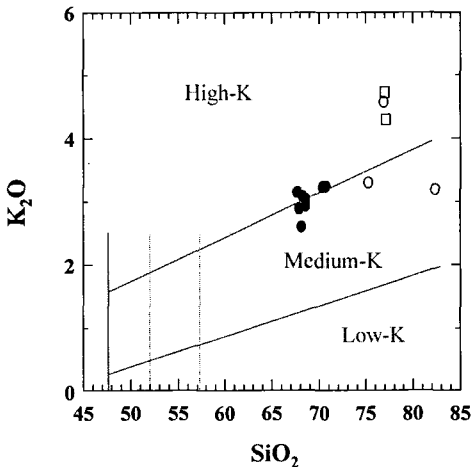


Fig. 9. K_2O vs. SiO_2 diagram of the volcanic rocks (from Gill, 1981). Symbols are the same as those in Fig. 5.

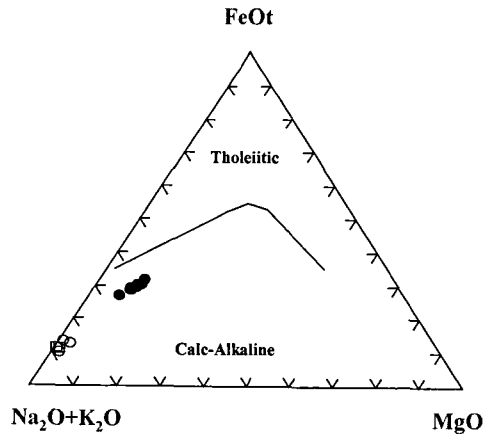


Fig. 8. AFM diagram for the volcanic rocks of the study area. (from Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as those in Fig. 5.

각된다(Hawkesworth and Powell, 1980). 인회석의 정출로 인해 P는 결핍되어 있다. Fig. 10은 내연산용회암이 지판의 섭입과 관련되어 형성된 호상열도 칼크-알칼리계열 암석의 특징을 잘 보여주고 있다(Pearce, 1983).

Fig. 11은 희토류원소의 함량을 콘드라이트(chondrite)값(Taylor and McLennan, 1985)으로 표준화하여 도시한 것이다. 평균 운석에 비해 희토류원소가 부화되어 있으며, 전체적으로 경희토류원소가 중희토류원소에 비해 부화된 경향을 보인다. 경희토류원소의 함량은 평균 운석의 약 80~120배이다. 내연산용회암과 유문암질 용회암의 희토류원소 패턴은 기울기가 거의 같고(내연산용회암의 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 비가 4.68~7.66, 유문암질 용회암이 4.64~7.25, 규장암은 6.25~6.48), 평행한 배열은 보여주면서, 전체 희토류원소 함량이 내연산용회암으로부터 유문암으로 가면서 다소 증가하는 경향을 보인다. 또한 Eu의 부(-)이상이 전반적으로 나타나고, 특히 규장암에서 더 강하다. 이러한 사실은 유문암질 용회암을 형성한 마그마가 내연산용회암을 형성한 데사이트질 마그마로부터 사장석을 포함하는 분별 정출 작용에 의해 형성되었을 가능성을 시사한다.

조구적 위치 및 암석 성인 고찰

지질학의 보편적 개념이 된 판구조론에 의해, 마그마의 형성은 판의 조구조 운동과 밀접하게 관련되어 있는

Table 5. Trace element abundances(ppm) of the volcanic rocks in the study area.

Sample	721-13	721-14	806-8	BG-1	BG-5	BG-6	BG-8	BG-9	721-5	722-5	722-7	BG-2	BG-3
	Naeyeonsan tuff						Rhyolitic tuff			Felsite			
Sr	117.2	66.7	172.8	32.0	250.0	274.8	202.2	21.1	116.2	69.1	49.1	22.7	58.5
Ba	75.4	58.8	222.7	54.0	496.3	518.3	530.2	525.1	172.8	288.0	658.7	133.7	265.7
Li	10.4	10.6	13.2	-	-	-	-	-	4.8	5.3	18.9	-	-
P	523.7	523.7	567.3	698.2	698.2	610.9	610.9	654.6	130.9	43.6	0.0	43.6	43.6
Cr	-	-	-	27.0	13.7	16.3	10.1	12.4	-	-	-	2.5	9.0
Zn	41.4	18.9	60.3	8.0	64.0	61.3	62.2	58.2	64.5	45.9	34.5	29.6	18.6
Zr	195.5	195.2	190.9	41.0	48.0	100.7	21.2	8.6	192.4	166.8	129.0	129.3	106.4
Co	65.4	58.9	70.2	216.0	58.0	67.2	55.2	57.7	63.9	78.4	68.5	172.6	103.4
Ni	26.0	9.3	35.3	11.0	3.7	5.6	2.9	4.6	27.2	41.4	54.8	2.1	2.6
Cu	5.4	6.7	9.2	14.0	8.3	10.0	5.5	10.7	2.2	12.2	1.0	2.7	6.5
Rb	58.0	87.6	77.5	140.0	84.3	100.5	72.8	276.1	74.3	167.7	116.2	90.9	107.9
Y	21.3	21.4	19.1	30.0	26.6	27.1	18.9	46.9	21.7	36.3	24.8	31.7	32.3
Nb	7.7	48.0	35.6	11.0	8.3	11.1	1.9	0.5	14.8	21.7	0.7	14.3	14.8
Mo	-	-	-	1.0	0.9	0.4	0.5	3.4	-	-	-	0.4	2.6
Cs	1.3	1.6	3.3	4.2	3.2	3.2	3.1	3.2	1.3	6.5	0.5	1.2	2.3
Hf	1.9	4.1	2.9	3.1	1.4	3.6	2.3	1.6	4.0	2.8	2.0	4.4	4.1
Ta	-	-	-	2.0	1.8	2.0	1.8	1.0	-	-	-	1.5	1.8
Pb	3.1	10.8	13.9	15.0	18.2	15.8	13.3	17.2	27.5	22.2	5.2	15.5	18.7
Th	9.5	13.9	9.6	9.0	9.3	9.3	9.3	8.9	16.7	13.6	11.2	22.9	22.0
U	2.5	4.3	3.0	2.4	2.5	2.6	0.6	2.4	4.1	3.6	2.5	5.7	6.0
Mn	471.0	312.2	864.0	-	-	-	-	-	555.4	738.7	434.7	-	-
Be	1.6	1.7	1.9	-	-	-	-	-	1.4	2.6	1.5	-	-
Ga	43.1	35.6	28.9	23.0	21.8	22.8	20.8	23.0	55.7	51.4	44.5	16.4	18.2

이 널리 알려졌다(Benioff, 1954; Kuno, 1966; Jake and White, 1969, 1972). Jake and White(1969, 1972)는 해구에서 내륙으로 가면서, 슬레이아이트질, 칼크-알칼리질, 알칼리질 마그마 계열의 암석들이 차례로 대상분포하는 경향이 있음을 지적하였다. 나아가 기원마그마의 특성과 분화양상을 자세하게 알게 되었고, 칼크-알칼리 마그마의 활동이 두 판이 수렴하는 곳에서 현저한 것이 밝혀졌다. 유라시아대륙 동북 연변부의 지질작용과 조구조 운동은 그 당시의 유라시아대륙과 접하고 있던 해양판의 상대적인 이동과 매우 밀접한 관계가 있음이 알려지게 되었다(Uyeda and Miyashiro, 1974). 경상분지의 화산암류에 K-h관계에 관한 이론(Kuno, 1966; Dickinson, 1975; Keith, 1978)을 적용하는 시도가 있었다. 김상욱(1986)과 이상만 등(1987)은 경상분지 화산암 분포지점에서 베니오프대에 이르는 심도가 170~230km의 범위에 있는 것으로 추정하고, 초생마그마의 생성심도와 관련지어 설명하였다. Sung et al.(1999)은

물을 함유한 감람암의 부분용융 깊이에 대한 연구와 K₂O 함량이 지각 물질에 의한 혼염과 섭입 슬랩의 유체에 의해서 증가할 수 있다는 연구로 섭입대의 깊이를 80~170km로 제한하였다.

경상분지 동북부에 위치하는 본 역의 화산암류는 지판의 섭입과 관련하여 생성된 호상열도 칼크-알칼리계열 화산암의 지화학적 특징을 잘 보여준다. 본 역의 조구적 위치를 알아보기 위하여, Wood(1980)가 제안한 Hf/3-Th-Nb/16의 조구조 판별도에 도시해 본 결과(Fig. 12), 본 역의 화산암류는 판이 침강 섭입하는 판 경계부(destructive plate margin)의 영역에 도시되고, 이 영역은 다시 Hf/Th비(3.0)을 기준으로 원시 호상 열도의 슬레이아이트 계열(Hf/Th)3.0)과 성숙한 호상 열도의 칼크-알칼리 계열(Hf/Th)3.0)화산암으로 구분할 때, 칼크-알칼리 계열의 영역에 해당한다.

또한 도호의 성숙도를 볼 수 있는 Th/Yb에 대한 La/Yb의 다이어그램(Brown et al., 1984)에서 이 지역

Table 6. Rare earth element abundances(ppm) of the volcanic rocks in the study area.

Sample	721-13	721-14	BG-1	BG-5	BG-6	BG-8
Naeyeonsan tuff						
La	26.7	29.8	25.9	22.7	25.6	22.5
Ce	55.4	55.8	52.8	54.2	51.1	46.7
Pr	7.9	8.5	6.0	6.4	5.9	5.4
Nd	21.1	23.0	22.6	23.9	21.6	19.3
Sm	6.2	6.3	4.6	6.7	4.2	3.8
Eu	1.4	1.5	1.0	1.1	0.9	0.8
Gd	7.1	6.6	4.3	4.5	4.0	3.5
Tb	1.0	1.0	0.6	0.7	0.6	0.5
Dy	6.3	5.7	3.9	4.4	3.8	3.5
Ho	1.3	1.2	0.8	0.9	0.7	0.7
Er	3.9	3.7	2.5	2.6	2.4	2.2
Tm	0.6	0.69	0.3	0.4	0.3	0.3
Yb	4.1	4.2	2.5	2.6	2.4	2.1
Lu	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3
Σ REE	143.5	148.5	128.2	131.5	123.9	111.6

Sample	BG-9	721-5	722-5	722-7	BG-2	BG-3
Rhyolitic tuff			Felsite			
La	25.2	50.5	37.5	28.8	37.0	31.4
Ce	51.7	100.2	81.6	50.7	64.5	63.2
Pr	6.1	10.2	9.7	6.3	8.0	6.8
Nd	22.1	36.2	35.0	27.1	27.4	26.0
Sm	4.3	6.6	8.1	5.3	4.9	4.3
Eu	0.9	1.2	1.7	1.3	0.1	0.3
Gd	4.1	7.6	9.1	6.1	4.5	4.0
Tb	0.6	1.1	1.5	0.9	0.7	0.7
Dy	3.7	6.6	9.1	6.0	4.4	4.3
Ho	0.8	1.4	1.8	1.2	0.9	1.0
Er	2.4	4.3	5.6	3.7	3.3	3.0
Tm	0.3	0.7	0.8	0.6	0.5	0.5
Yb	2.4	5.0	5.8	3.9	4.1	3.6
Lu	0.4	0.7	0.8	0.6	0.6	0.5
Σ REE	125.0	232.2	208.1	142.5	160.9	149.6

의 화산암류는 판이 섭입하는 환경 중에서도 대륙연변 호 영역에 도시된다(Fig. 13).

본 역의 내연산용회암의 중회토류원소는 호상열도 안산암과 데사이트의 회토류 원소 패턴과 같이 평탄한 모양을 나타낸다(Gill, 1981). 즉 본 역 화산암류를 만든 데사이트질 마그마는 섭입과 관련하여 상부 맨틀의 맨틀 웨지(wedge)에서 생성된 현무암질 마그마로부터 진

화된 안산암질 마그마가 분별 정출 작용을 거쳐 만들어졌을 가능성이 크다. 본 역에서와 같이 성숙한 대륙연변호에서는 지각의 두께가 두껍고, 비중이 큰 현무암질 마그마가 지각을 뚫고 나오지 못하고, 지각 하부의 마그마 챔버에 머무르는 동안 분별 정출 작용이 일어나게 된다. 그 후에 밀도가 낮은 안산암질 마그마가 만들어지면서, 지표로 상승한다(Wilson, 1989). 마그마가 이러

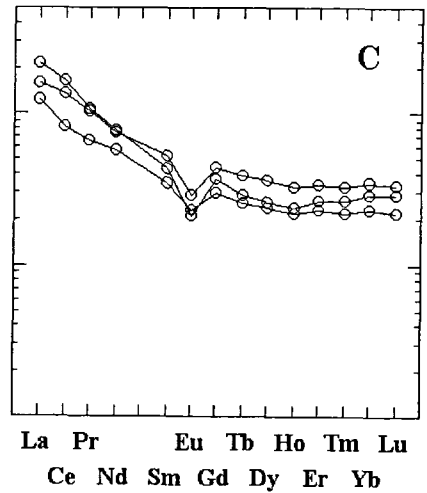
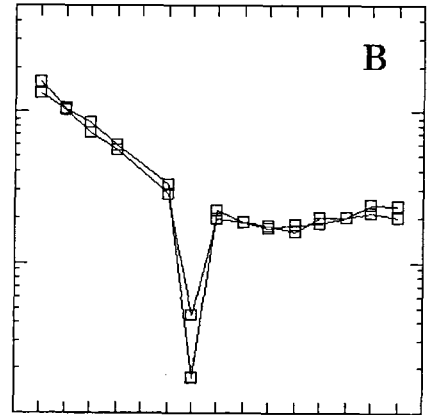
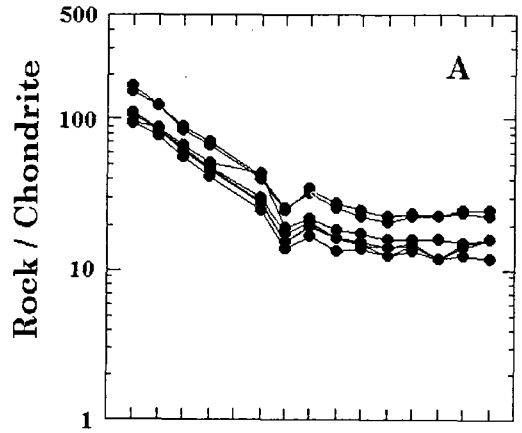
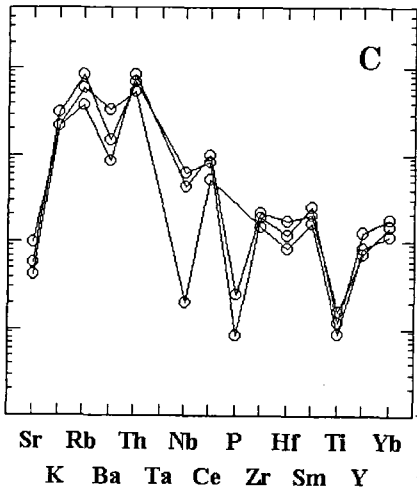
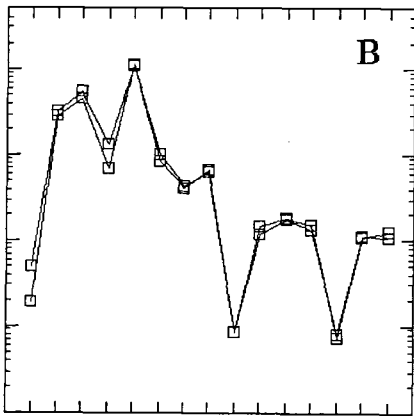
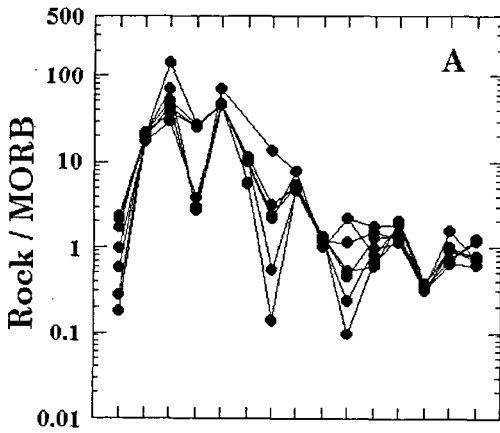


Fig. 10. MORB-normalized trace element patterns for the volcanic rocks in the study area. The order of the elements and values of the normalizing constants are from Pearce et al. (1981). (A, Naeyeonsan tuff; B, felsite; C, rhyolitic tuff).

Fig. 11. Chondrite-normalized rare earth element abundances of volcanic rocks in the study area. (A, Naeyeonsan tuff; B, felsite; C, rhyolitic tuff). Chondrite value used in normalizing REE from Taylor and McLennan (1985).

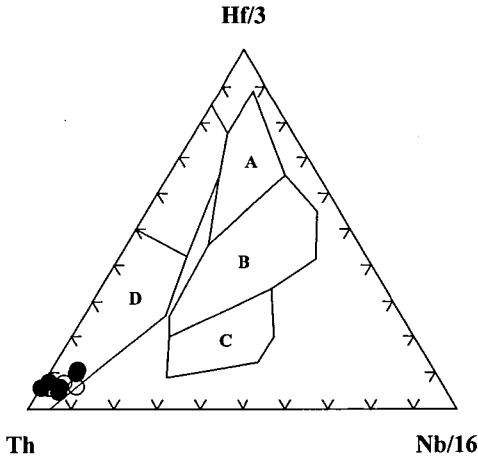


Fig. 12. Tectonomagmatic discriminant of Hf-Th-Nb for the volcanic rocks(from Wood, 1980). (A, N-type MORB; B, E-type MORB and tholeiitic WPB and differentiates; C, alkaline WPB and differentiates; D, destructive plate margin basalts and differentiates). Symbols are the same as those in Fig 5.

한 진화를 거쳐 데사이트질 내지 유문암질 마그마가 천부에서 생성되어 분출하게 된다. 또한 분별 정출 작용이 일어나는 동안 발생하는 열에 의해 지각의 혼염을 겪을 가능성도 나타날 수 있다.

결론

보경사 화산암체를 구성하는 내연산응회암은 암청색-녹회색의 데사이트질 라필리 응회암이며, 하부에서는 다양한 크기의 각력들을 포함하고 있으며, 상부로 갈수록 각력의 양이 현저히 줄어든다. 사장석 반정은 상부로 갈수록 양이 적어지며, 석영 반정의 양은 상대적으로 많아진다. 본 응회암은 피아메가 잘 관찰되는 용결회류응회암이다. 경하관찰에서, 내연산 응회암은 사장석, 각섬석, 석영 등의 반정광물, 암편, 그리고 유리질 석기로 구성되어 있다.

내연산 응회암의 SiO₂ 함량은 68~71wt%로 대체로 데사이트/유문데사이트의 조성이며, 유문암질 응회암은 75~82wt%, 규장질 암맥은 77wt%로서 유문암의 조성을 나타낸다. TAS 성분도에서는 비알칼리암 계열에, AFM도에서는 칼크-알칼리암 계열에 도시된다. SiO₂에 대한 K₂O 성분도에서는 중~고-K 칼크-알칼리암의 특

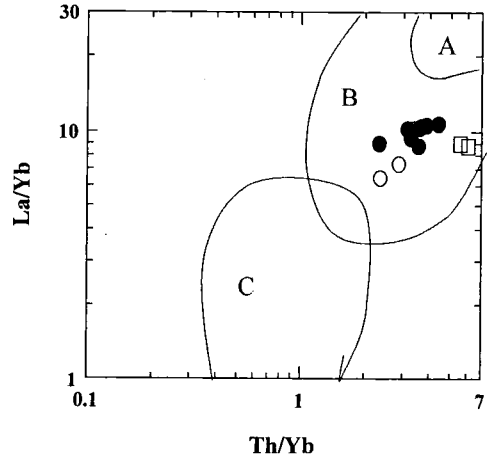


Fig. 13. Th/Yb vs. La/Yb diagram(Brown et al., 1984) showing arc maturity. (A, Andean arc; B, Continental margin arc; C, oceanic arc). Symbols are the same as those in Fig. 5.

징을 나타낸다.

본 역 화산암류의 미량원소와 희토류원소 패턴은 지판의 섭입에 관련된 화산암의 특징을 잘 나타내고 있다. 미량원소를 평균 MORB 값으로 표준화하여 특징을 살펴보면, K, Rb, Th, Ta이 MORB에 비하여 상당히 부화되어 있는 반면에 Nb, Zr, Hf, Ti, Y, Yb은 MORB와 거의 같거나 결핍된 양상을 보여준다. 희토류원소의 패턴은 전체적으로 경희토류원소가 중희토류원소에 비하여 부화되어 있으며, 내연산 응회암과 규장질 암맥의 패턴의 기울기가 같고, 대체로 평행한 배열을 보여준다. 전체 희토류원소 함량이 내연산 응회암으로부터 규장질 암맥으로 증가하며, 규장질 암맥이 현저히 Eu 부(-) 이상을 보인다는 사실은 유문암질 마그마가 데사이트질 마그마로부터 사장석을 포함하는 분별 정출 작용에 의하여 형성되었음을 시사한다.

Wood(1980)의 Hf/3-Th-Nb/16 조구조 판별도에서 본 역의 화산암류는 암석권의 판이 침강섭입하는 지판경계부의 영역에 접시되며, 그 중에서도 Hf/Th의 비(3.0)에 의해 칼크-알칼리암 계열 암석의 영역에 해당된다. 이는 본 역의 암석들이 다소 성숙된 화산호 환경 하에서 형성되었음을 나타내며, 불호정성 미량원소 패턴의 해석과도 잘 일치한다. La/Yb-Th/Yb 성분 판별도에서도 정상적인 대륙연변호의 영역에 도시된다.

사 사

본 논문을 읽고 문제점과 오류를 지적해 주시고 부족한 점을 보완 수정을 해 주신 경상대학교 좌용주 박사, 한국해양연구소의 이중익 박사께 감사를 드리며, 도면 작업을 도와준 부산대학교 대학원 지구과학과 김향수에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 권영일 · 이인기, 1973, 한국지질도. 도평도폭. 국립지질조사소, 12 p.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만교수 송수 기념 논문집, 167-194.
- 김상욱 · 이재영 · 김영기 · 고인석, 1991, 남부 유천소분지에 분포하는 백악기 화산암의 암석학적 특징. 지질학회지, 29, 324-337.
- 김옥준 · 윤 선 · 길영준, 1968, 한국지질도. 청하도폭. 국립지질조사소, 16 p.
- 원종관, 1968, 경상분지에서의 백악기 화성활동에 관한 연구. 지질학회지, 4, 215-236.
- 윤성효, 1987, 경상분지 북부의 백악기 화산암물구조. 부산대학교 박사학위논문, 83 p.
- 윤성효, 1993, 의성분지 중앙부 금성산 화산암복합체의 화산활동과 콜드론 구조. 지질학회지, 29(4), 309-323.
- 윤성효 · 고정선 · 한미경 · 안지영, 1998, 경상분지 동북부 내연산 응회암에 대한 화산 암석학적 연구. 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, p. 87.
- 임성아, 1995, 고제3기 에오세의 지경동화산암류의 암석학적 연구. 부산대학교 석사학위 논문, 54 p.
- 이상만 · 김상욱 · 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의미. 지질학회지, 23, 338-359.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사산성화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 85-106.
- 차문성, 1979, 밀양 동남부의 백악기 후기 산성화산암류의 암석학적 연구. 부산대학교 자연과학 논문집, 27, 141-153.
- 황상구 · 김상욱, 1994a, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구 (I): 암석구조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- 황상구 · 김상욱, 1994b, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구 (II): 암석성인. 지질학회지, 30, 563-577.
- 황상구, 1996, 양산칼데라에 관련된 화산암류의 암석학적 진화. 지질학회지, 32, 208-222.
- 황상구, 1998, 청송 주왕산 일대의 화산지질. 대한지질학회 98 춘계학술답사 자료집, 42 p.
- 황상구 · 조남식, 2000, 영덕 남부 내연산 응회암의 회류 공극 지역 해석. 2000년도 공동학술발표회 논문집, 한국암석학회 · 한국광물학회, p. 15.
- Benioff, H., 1954, Orogenesis and deep crustal structure; Additional evidence from seismology. Geological Society of America Bulletin, 65, 385-400.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S., and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources, Journal of Geological Society of London, 141, 413-426.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., 1972, Rock forming minerals 1, ortho- and ring silicates. Longmans, Group Ltd, London, England, 77-112.
- Dickinson, W.R., 1975, Potash-depth(K-h) relations in continental margin and intra-oceanic magmatic arcs. Geology, 3, 53-56.
- Gill, J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 390 p.
- Hawkesworth, C.J., and Powell, M., 1980, Magma genesis in the Lesser Antilles island arc. Earth and Planetary Science Letter, 51, 297-308.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8, 523-548.
- Jake, P. and White, A.J.R., 1969, Structure of the Melanesian arcs and correlation with distribution of magma type. Tectonophysics, 8, 222-236.
- Jake, P. and White, A.J.R., 1972, Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. Geological Society of America Bulletin, 83, 29-40.
- Keith, S.B., 1978, Paleosubduction geometrics inferred from Cretaceous and Tertiary magmatic patterns in southwestern North America. Geology, 6, 516-521.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. In Poole, W.H. ed., Continental margins and island arcs, "International upper mantle project symposium". Geological Survey of Canada Paper, 66-15, 317-335.
- Leake, B. E., 1978, Nomenclature of amphiboles. Mineralogical Magazine, 42, 533-563.
- Marsh, B.D. and Carmichael, I.S.E., 1974, Benioff zone magmatism. Journal Geophysical Research, 79, 1196-1206.
- Moore, J.G. and Peck, D.L., 1962, Accretionary lapilli in volcanic rocks of the western continental United States. Geology, 70, 182-193.
- Pearce, J.A., Alabaster, T., Shelton, A.W., and Searle, M.P., 1981, The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin

- complex: evidence and implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series, A300*, 299-300.
- Pearce, J.A., 1983, The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In C.J. Hawkesworth and M.J. Norry(eds), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Nantwich, Shiva, 230-249.
- Ross, C.S. and Smith, R.L., 1961, Ash flow tuffs; their origin, geologic relations and identification. *United State Geological Survey Professional Paper 366*, 81 p.
- Reimer, T.O., 1983, Accretionary lapilli in volcanic ash falls: physical factors governing their formation. In Peryt, T.M. (ed), *Coated Grains*. Springer, Berlin, 56-68.
- Schumacher, R., and Schmincke H.U., 1991, Internal structure and occurrence of accretionary lapilli - a case study at Laacher See volcano. *Bulletin of Volcanology*, 53, 612-634.
- Sung, J.G., Kim, J.S., and Yang, K.H., 1999, Petrochemical study on the volcanic rocks related to depth to the Benioff zone and crustal thickness in the Kyongsang Basin, Korea. A review. *Economic Environmental Geology*, 32, 323-337.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.
- Uyeda, S. and A. Miyashiro, 1974, Plate tectonics and the Japanese Island: A synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 1159-1170.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466 p.
- Winchester, J.A. and Floyd P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.
- Wright, F.E., 1915, Obsidian from Hrafnatinnuhryggur, Iceland: Its lithophysae and surface marking. *Geological Society of America Bulletin*, 26, 255-286.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Nb diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letter*, 50, 11-30.

2000년 7월 13일 원고 접수
2000년 8월 31일 수정원고 접수
2000년 10월 7일 원고 채택